

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

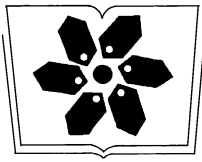
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 9 期 Vol.32 No.9 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 9 期

2012 年 5 月 (半月刊)

目次

不同土地覆被格局情景下多种生态系统服务的响应与权衡——以雅砻江二滩水利枢纽为例	葛菁, 吴楠, 高吉喜, 等 (2629)
放牧对小嵩草甸生物量及不同植物类群生长率和补偿效应的影响	董全民, 赵新全, 马玉寿, 等 (2640)
象山港日本对虾增殖放流的效果评价	姜亚洲, 凌建忠, 林楠, 等 (2651)
城市景观破碎化格局与城市化及社会经济发展水平的关系——以北京城区为例	仇江啸, 王效科, 逯非, 等 (2659)
江河源区高寒草甸退化序列上“秃斑”连通效应的元胞自动机模拟	李学玲, 林慧龙 (2670)
铁西区城市改造过程中建筑景观的演变规律	张培峰, 胡远满, 熊在平, 等 (2681)
商洛低山丘陵区农林复合生态系统光能竞争与生产力	彭晓邦, 张硕新 (2692)
基于生物量因子的山西省森林生态系统服务功能评估	刘勇, 李晋昌, 杨永刚 (2699)
不同沙源供给条件下柽柳灌丛与沙堆形态的互馈关系——以策勒绿洲沙漠过渡带为例	杨帆, 王雪芹, 杨东亮, 等 (2707)
桂西北喀斯特区原生林与次生林凋落叶降解和养分释放	曾昭霞, 王克林, 曾馥平, 等 (2720)
江西九连山亚热带常绿阔叶林优势种空间分布格局	范娟, 赵秀海, 汪金松, 等 (2729)
秦岭山地锐齿栎次生林幼苗更新特征	康冰, 王得祥, 李刚, 等 (2738)
极端干旱环境下的胡杨木质部水力特征	木巴热克·阿尤普, 陈亚宁, 等 (2748)
红池坝草地常见物种叶片性状沿海拔梯度的响应特征	宋璐璐, 樊江文, 吴绍洪, 等 (2759)
改变 C 源输入对油松人工林土壤呼吸的影响	汪金松, 赵秀海, 张春雨, 等 (2768)
啮齿动物捕食压力下生境类型和覆盖处理对辽东栎种子命运的影响	闫兴富, 周立彪, 刘建利 (2778)
上海闵行区园林鸟类群落嵌套结构	王本耀, 王小明, 王天厚, 等 (2788)
胜利河连续系统中蜉蝣优势种的生产量动态和营养基础	邓山, 叶才伟, 王利肖, 等 (2796)
虾池清塘排出物沉积厚度对老鼠簕幼苗的影响	李婷, 叶勇 (2810)
澳大利亚亚热带不同森林土壤微生物群落对碳源的利用	鲁顺保, 郭晓敏, 芮亦超, 等 (2819)
镜泊湖岩溶台地不同植被类型土壤微生物群落特征	黄元元, 曲来叶, 曲秀春, 等 (2827)
浮床空心菜对氮循环细菌数量与分布和氮素净化效果的影响	唐莹莹, 李秀珍, 周元清, 等 (2837)
促分解菌剂对还田玉米秸秆的分解效果及土壤微生物的影响	李培培, 张冬冬, 王小娟, 等 (2847)
秸秆还田与全膜双垄集雨沟播耦合对半干旱黄土高原玉米产量和土壤有机碳库的影响	吴荣美, 王永鹏, 李凤民, 等 (2855)
赣江流域底泥中有机氯农药残留特征及空间分布	刘小真, 赵慈, 梁越, 等 (2863)
2009 年徽州稻区白背飞虱种群消长及虫源性质	刁永刚, 杨海博, 瞿钰锋, 等 (2872)
木鳖子提取物对朱砂叶螨的触杀活性	郭辉力, 师光禄, 贾良曦, 等 (2883)
冬小麦气孔臭氧通量拟合及通量产量关系的比较	佟磊, 冯宗炜, 苏德·毕力格, 等 (2890)
专论与综述	
基于全球净初级生产力的能源足迹计算方法	方恺, 董德明, 林卓, 等 (2900)
灵长类社会玩耍的行为模式、影响因素及其功能风险	王晓卫, 赵海涛, 齐晓光, 等 (2910)
问题讨论	
中国伐木制品碳储量时空差异分析	伦飞, 李文华, 王震, 等 (2918)
研究简报	
森林自然更新过程中地上氮贮量与生物量异速生长的关系	程栋梁, 钟全林, 林茂兹, 等 (2929)
连作对芝麻根际土壤微生物群落的影响	华菊玲, 刘光荣, 黄劲松 (2936)
刈割对外来入侵植物黄顶菊的生长、气体交换和荧光的影响	王楠楠, 皇甫超河, 陈冬青, 等 (2943)
不同蔬菜种植方式对土壤固碳速率的影响	刘杨, 于东升, 史学正, 等 (2953)
巢湖崩岸湖滨基质-水文-生物一体化修复 陈云峰, 张彦辉, 郑西强 (2960)	

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 336 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-05



封面图说: 在交配的雨蛙——雨蛙为两栖动物, 世界上种类达 250 种之多, 分布极广。中国的雨蛙仅有 9 种, 除西部一些省份外, 其他各省(区)均有分布。雨蛙体形较小背面皮肤光滑, 往往雄性绿色, 雌性褐色, 其指、趾末端多膨大成吸盘, 便于吸附攀爬。多生活在灌丛、芦苇、高秆作物上, 或塘边、稻田及其附近的杂草上。白天匍匐在叶片上, 黄昏或黎明频繁活动, 捕食能力极强, 主要以昆虫为食。特别是在下雨以后, 常常 1 只雨蛙先叫几声, 然后众蛙齐鸣, 声音响亮, 每年在四、五月份夜间发情交配。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjiw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201104010429

李学玲, 林慧龙. 江河源区高寒草甸退化序列上“秃斑”连通效应的元胞自动机模拟. 生态学报, 2012, 32(9): 2670-2680.

Li X L, Lin H L. Cellular automata simulation of barren patch connectivity effect in degradation sequence on alpine meadow in the source region of the Yangtze and Yellow rivers, Qinghai-Tibetan Plateau, China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(9): 2670-2680.

江河源区高寒草甸退化序列上“秃斑” 连通效应的元胞自动机模拟

李学玲, 林慧龙*

(草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730020)

摘要:高寒草甸草毡层“秃斑”是高寒草甸退化进程中最活跃的表征,明确其在退化序列上的演变时空规律是揭示草地退化动力学机制的关键之一。采用实地调研结合元胞自动机模拟的方法,对高寒草甸退化序列上秃斑格局动态进行了模拟,是对退化序列上秃斑的连续动态图谱表达,建立了高寒草甸由初步退化到系统崩溃的符合实际的草地秃斑连通的图谱序列,模拟吻合度达 93.9%。通过对图谱序列关系的分析表明,秃斑连通进程分为 3 个阶段:低速连通期——第 0—2 年、跃变期——第 2—7 年、连通不可逆转期——第 7—9 年;最大秃斑面积、最大秃斑面积-秃斑总面积比的跃变过程,是草地退化等级的质变过程;通过对跃变期和连通不可逆转期相应的草地生态与恢复性能的对比分析,确定了连通阈值为 54.5%;秃斑连通的过程伴随着临界现象的发生。由于连通不可逆转期“黑土滩”形成过程的不可逆性及形成后的巨大危害性,连通阈值的确定将为高寒草甸生态系统安全预警及其退化恢复治理提供依据。

关键词:江河源区;高寒草甸;秃斑;元胞自动机;模拟;连通阈值

Cellular automata simulation of barren patch connectivity effect in degradation sequence on alpine meadow in the source region of the Yangtze and Yellow rivers, Qinghai-Tibetan Plateau, China

LI Xueling, LIN Huilong*

State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu Province 730020, China

Abstract: The source region of Yangtze River and Yellow River plays an important role in the carbon source/sink cycle and is a focal point for ecological environment management; however, it is also one of China's most vulnerable ecological systems. This vulnerability is due to human and livestock population expansion; large area of alpine meadow are experiencing overgrazing and climate change, with barren patches developing and connecting with each other. Barren patches develop in a range of sizes and shapes, presenting an infertile “black soil” type landscape in the final stage of grassland degradation. The driving mechanisms of alpine meadow degradation are complex and remain controversial, making it difficult to determine individual causes of degradation and to take effective measures to counter them. Thus, this investigation employed “black box” theory to avoid these uncertain elements in its examination of spatial patterns and temporal evolution in barren patches. This investigation aimed to clarify the role barren patch evolution and connectivity plays in alpine meadow degradation, providing an increased understanding of alpine meadow ecosystems as the basis for ecological maintenance, restoration and management.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31172250,30730069)

收稿日期:2011-04-01; **修订日期:**2012-01-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: linhuilong@lzu.edu.cn

A simulation method of complexity science, cellular automata, was used to model the development of barren patches in this study. The initial iteration data for the model were obtained from observations of moderately degraded meadows with the lowest barren patch percentage, and were used to draw a matrix in which each cell was represented as either 0 or 1; 0 representing a cell where vegetation cover was lower than 50% and 1 representing cells where vegetation cover was over 50%. Based on field observations of barren patch percentage and landscape structure, including the experience of local herdsman whose livelihoods are inextricably linked to the grassland, the simulation time step was set to one year per iteration. Further field observations of barren patch evolution and other features of their spatial distribution at different stages of degradation were used to define the rules of the model, and Matlab 7.0 was used as a platform for simulation. Cell neighborhoods were defined as the Moore type and cellular space was treated according to the reflective boundary rule. Using this combination of field research techniques and cellular automata simulation, realistic developmental graphs modeling the connectivity of barren patches from the initial degradation stage to the collapse of the alpine meadow system were established. The goodness of fit for the simulation analyses averaged 93.9%. Results further indicated that in the degradation sequence, there were three defined degradation stages: a low-speed connectivity stage from 0 to 2 years, a jump stage from 2 to 7 years and an irreversible connectivity stage from 7 to 9 years. Additionally, a sudden change was found to occur at the beginning of each stage, identifying a threshold characteristic in the process of barren patch connectivity. Through comparative analysis of the performances of grassland ecology and restoration between the jump stage and the irreversible connectivity stage, the connectivity threshold was calculated at 54.5% as a protection index of the alpine meadow. The irreversibility of ecological harm associated with large barren patches highlights the importance of determining and using the connectivity threshold to identify and determine priority sites for restoration.

Key Words: source region of Yangtze River and Yellow River; alpine meadow; barren patch; cellular automata; simulation; connectivity threshold

江河源区是我国长江、黄河和澜沧江的发源地,地处青藏高原腹地,由于源区气候严酷、植物生长期短、土壤砾质性强、土层薄、生态系统脆弱及自我恢复能力差等自然因素,使得该区域成为我国生态系统最脆弱的地区,但源区生态环境的变化及其保护一直是世人关注的焦点。江河源区被誉为“中华水塔”,是保障整个三江流域中下游地区乃至东南亚国家水安全极为重要的生态功能区,而且源区高寒草甸土壤碳储量高^[1-4],在我国甚至全球的碳源汇管理和生态环境建设中起着举足轻重的作用^[5-7]。作为源区自然生态系统主体的高寒草甸,与世界上其它著名的高寒草甸相比,是唯一被全年放牧利用的^[8],它既是支撑高原畜牧业发展、维系农牧民生活水平的重要物质基础,又对涵养水源、保护生物多样性和固定碳素等生态功能起着不可替代的作用^[9-10],其环境效应直接关系到中华民族的生存发展和千秋万代的根本利益^[9-11]。

江河源区生态环境的变化和高寒草甸生态系统的特殊生态服务价值引起了国家和社会的广泛关注。近几十年来大量的文献报道了江河源区随着人口和牲畜数量的增多,在全球变暖的大背景下,超载过牧,导致高寒草甸大面积退化,“黑土滩”不断扩展^[12-15]。据报道^[16-19],江河源地区 90% 以上的草地出现了不同程度的退化。其中,中度以上的退化草地 0.12 亿 hm^2 ,约占该区草地可利用面积的 60% 以上。气候变化作为一个相对缓慢的过程,对草地退化的影响甚微,人类对草地的过度利用和破坏是近几十年来高寒草甸退化的主要原因^[20]。对于高寒草甸退化,现有的研究均笼统地归因于超载放牧和鼠类活动的破坏,但大量的试验研究证明,单一的禁牧封育无法完全恢复江河源区“黑土滩”退化草地^[21-23],这反映了人们对草地退化的本质理解不够深刻,是造成退化高寒草甸的治理收效甚微的原因之一^[15]。过度放牧导致高寒草甸系统退化诊断层的草毡层^[17]“秃斑”大量出现,也为鼠类的入侵创造了条件,鼠害加重,导致高寒草甸大面积退化,“秃斑”逐渐扩大、连通,使得“黑土滩”不断扩展,对水土流失起了加速作用^[12-15, 24],侵蚀导致土壤以 CO_2 、 CH_4 的形式向大气中散射有机碳^[25-26]。目前有关退化高寒草甸的文献主要涉及了“黑土型”退化草地的成因与“秃斑”表现特

征的研究,“秃斑”的连通效应在退化序列上的作用和机制未见报道。因此,以空间代替时间,研究草地退化序列上秃斑的数量、面积、格局等特征及其连通规律,是极具研究价值的科学问题,对高寒草甸生态系统的维系、恢复和管理都具有重要科学意义。

鉴于高寒草甸退化机理的复杂性,本研究借鉴黑箱系统辨识法的思想和景观生态学的研究思路,采用复杂性科学中的一种研究方法——元胞自动机^[27-28](Cellular Automata,简称CA),实地调研结合CA模拟,以空间代替时间,研究草地退化序列上秃斑的空间格局及其连通规律,明确秃斑演变、连通在高寒草甸退化序列上的作用,以期高寒草甸生态保护及其退化恢复治理提供依据。

1 研究方法

1.1 样地概况

研究地点设在青海省果洛藏族自治州玛沁县大武乡的高寒草甸试验站^[29-31],地理坐标为 $34^{\circ}17'—34^{\circ}27'N$, $100^{\circ}4'—100^{\circ}26'E$,海拔3740—3780 m(图1),为典型的高原寒冷气候。无绝对无霜期,年平均气温为 $-3.9^{\circ}C$ 左右, $\geq 0^{\circ}C$ 积温为 $914.3^{\circ}C$,最冷月1月的平均气温为 $-12.6^{\circ}C$,最热月7月的平均气温为 $9.7^{\circ}C$,年均降水量459.2 mm,其中6—9月降水量约占全年降水量的75%,年蒸发量为2471.6 mm。日照百分率为50%—65%,年日照时数约2576 h,太阳辐射强,昼夜温差大;野生牧草生长期约110—130 d。土壤类型以高山草甸土为主,土层较薄,厚度一般为30—60 cm,母质以坡积物、残积物为主。原生植被类型是以小嵩草(*Kobresia Pygmaea*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)为建群种的高寒嵩草草甸。

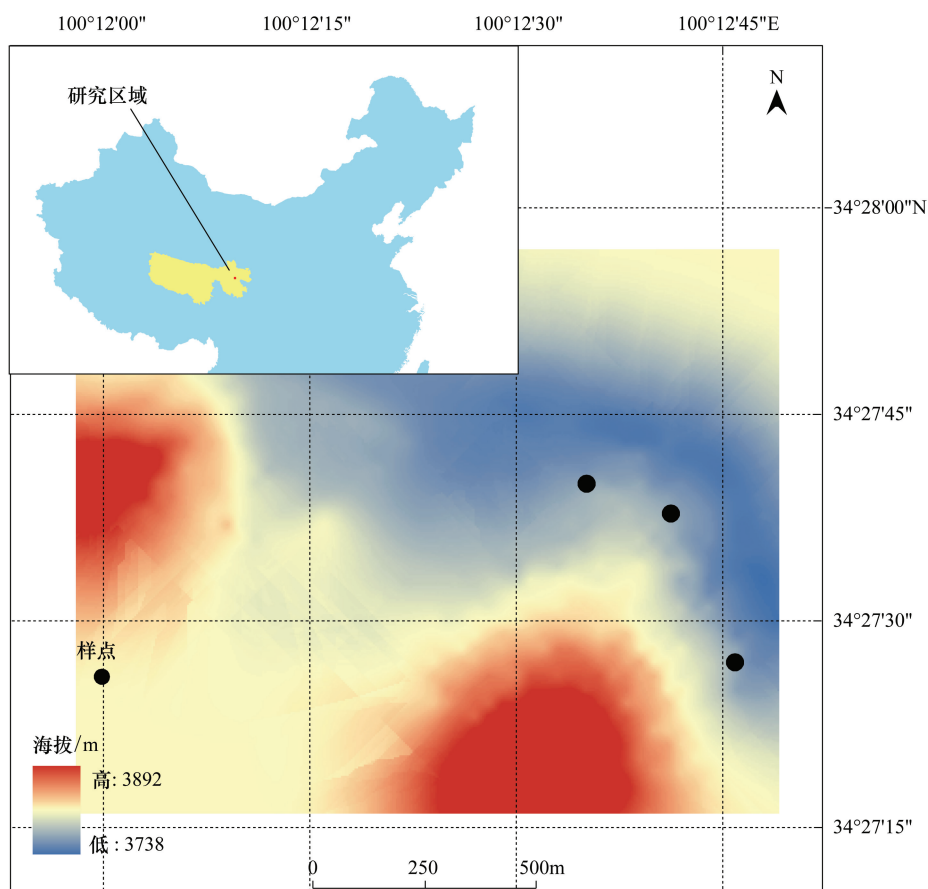


图1 研究区及样地的地理位置

Fig. 1 The location of the study area and sample sites

中国边界数据采用国家基础地理信息中心2005年发布的1:400万中国行政区划数据

1.2 CA 建模

1.2.1 数据采集

采用以空间代替时间的研究方法,据马玉寿等^[32]对“黑土滩”退化草地分级标准,于2010年8月在试验区范围内选择3个典型样地,分为中度、重度及极度退化草地(图1、表1)。在每个退化样地内随机选取5个160 cm×160 cm样方,每个样方平均分为边长为5 cm的网格,现场绘制“秃斑”分布图(用0—1矩阵记录,表示其空间相对位置),目测各个网格,盖度≥50%记为1,盖度<50%记为0。

引用和盖度相对的概念——秃斑度,用于描述秃斑面积占样方面积的百分比,其计算公式为:秃斑度=1-盖度=秃斑面积/样方面积,相应地,总秃斑度=1-样方盖度=秃斑总面积/样方面积;最大秃斑度(即最大秃斑的秃斑度)=最大秃斑面积/样方面积。

表1 样方区概况

Table 1 The conditions of representative alpine meadow quadrats

样地类型 Representative alpine meadow samples	坡度和坡向 Slope and aspect	植被状况 Conditions of vegetation
中度退化草甸 Moderately degraded meadow	11°, 西北	蒿草属植物较多,总盖度达70%—80%,其他植被成分有:黄帚橐吾(<i>Ligularia virgaurea</i>)、鹅绒委陵菜(<i>Potentilla anserina</i>)、甘肃马先蒿(<i>Pedicularis kansuensis</i>)等
重度退化草甸 Heavily degraded meadow	12.5°, 东北	以杂类草为主,毒草比例较大,总盖度达55%—70%,优势种为冷蒿(<i>Artemisia frigida</i> .)、白苞筋骨草(<i>Ajuga lupulina</i> Maxim.)、铁棒锤(<i>Aconitum anthora</i>)、乳白香青(<i>Anaphalis lactea</i>)、狼毒(<i>Stellera chamaejasme</i> L.)、摩罗草(<i>Morina coulteriana</i>)等
极度退化草甸 Extremely degraded meadow	17°, 正南	秃斑几近连通,约80%的草皮表层被剥蚀,心土裸露,土壤粗骨性

1.2.2 CA 模型的建立

CA建模的基本思路和目标:将草地实体的空间和时间特征统一在CA中,根据实地观测和数据分析,制定能反映实际的邻域转化规则,通过模型的迭代来表现秃斑格局动态变化。具体流程如图2所示。从中度退化区样方中选取秃斑度最小的样方,将其对应的草地斑块分布图——0-1矩阵(0-1矩阵为元胞空间,0、1为元胞,0代表元胞状态为秃斑,1代表元胞状态为草地)作为模拟的初始值。由于本研究中不同退化程度草地的准确退化年限难以考证,且进行长时间的实地观测不现实,因此以空间代替时间进行研究。由于缺失研究区草地退化年限的准确监测数据,调查访问了当地牧民,得到3块样地退化的大致年限。根据牧民所述的退化年限和CA模型的迭代次数比对,把模拟的退化阶段和实际退化阶段样方的草地秃斑的比例、格局特征对照分析,得出一次迭代大致为1a的演变,即时间步长为1a,从而使模型和实地秃斑演变结合起来;基于同样的方法及演变过程中的跃变特征,把模拟过程分为和中度、重度、极度退化相对应的3个阶段。根据实地观测的秃斑演变不同阶段的空间分布数据,定义秃斑格局的空间演变规则,即元胞自动机的邻域转化规则;以Matlab 7.0为平台编制计算机程序进行模拟,并用实地观测的空间数据来校准,对演变规则进行不断地微调,以使模拟过程中秃斑度的变化更符合实际情况,实现对草地秃斑演变较精确模拟。邻居的定义采用Moore规则^[33],元胞空间边界处理采用反射型(即边界外邻居的元胞状态是以边界为轴的镜面反射)。

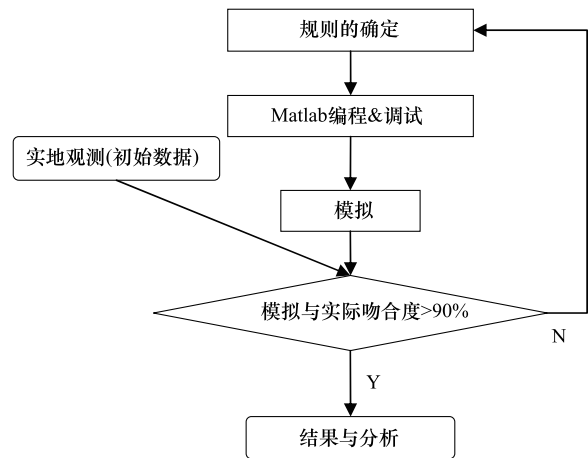


图2 草地秃斑空间模型建模流程图

Fig. 2 Flowchart of barren patch spatial modeling

2 结果与分析

2.1 秃斑格局动态图与实地调研数据对比

根据实地观测的秃斑演变不同阶段的空间分布数据,定义其演变规则为:如果元胞周围有 3 个或 3 个以上元胞为秃斑,则下一时刻此元胞状态转变为秃斑;如果元胞周围有 6 个或 6 个以上元胞为草地,则下一时刻此元胞状态不发生改变。依此规则模拟得到秃斑格局动态图 3。

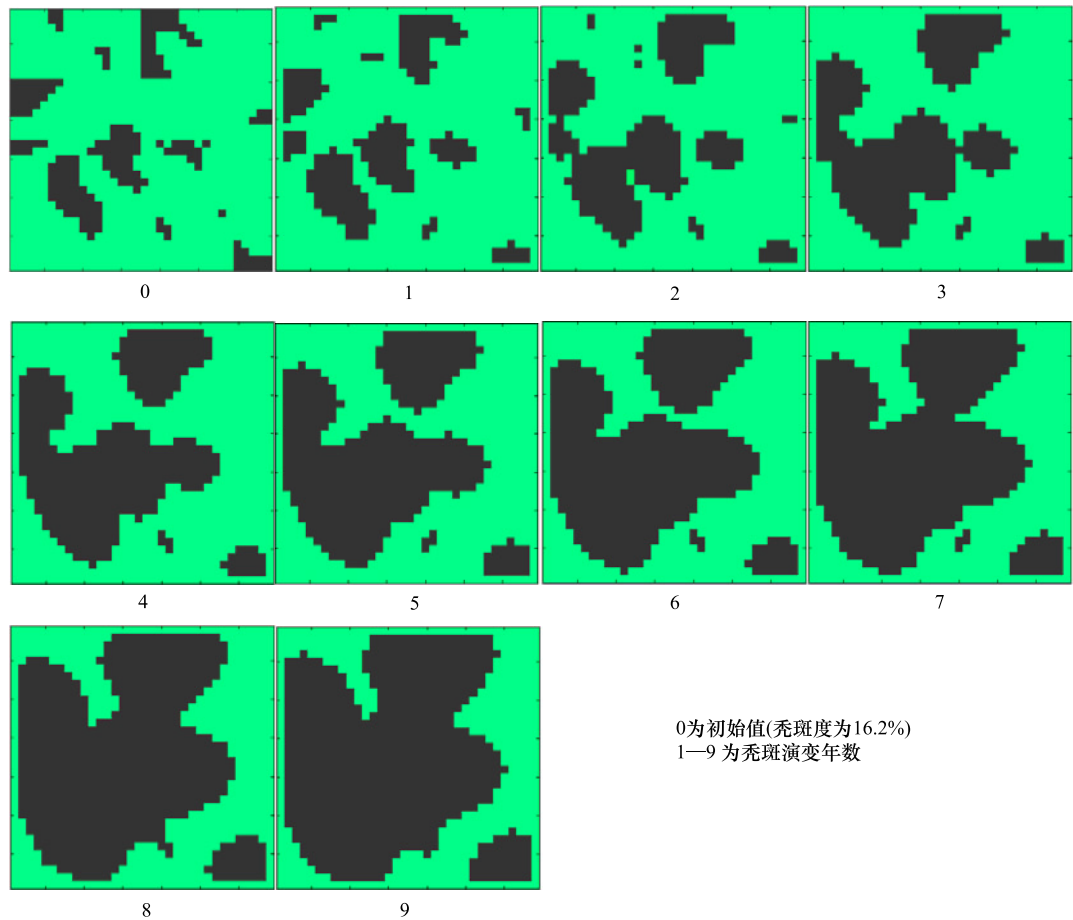


图 3 高寒草甸退化序列上“秃斑”连通动态模拟图谱

Fig. 3 Dynamic modeling graphs of barren patches connectivity in degradation sequence on alpine meadow

秃斑格局动态模拟图(图 3)是对高寒草甸退化序列上秃斑连续动态的图谱表达,直观地展示了秃斑格局和秃斑度的年际变化。草地秃斑格局直接影响着秃斑的演变进程,而秃斑度则是反映草地退化程度的重要指标。如图 3 中 0 图所示,用每个单独存在的元胞表示秃斑存在状态。分析表 2,最初 14 个零星分布的秃斑占样方面积的 16.9%,在演变 1 年之后,最大秃斑的秃斑度为 6.1%,总秃斑度为 23.6%,仍处于中度退化水平。而演变第 2 年则发生了明显的突变,并伴随着临界阈现象(是指某一事件或过程在影响因素或环境条件达到一定程度时突然地进入另一种状态的情形)的发生,此时最大秃斑的秃斑度增加到 18.8%,总秃斑度达 29.5%,明显超过了中度退化区总秃斑度的均值(20.8%),向重度退化阶段演变。第 3 年,秃斑演变已正式进入重度退化阶段,最大秃斑的秃斑度为 26.7%,总秃斑度为 36.2%,总秃斑度趋近重度退化区的平均值(37.2%)。而第 7 年突变再次发生,最大秃斑度达 57.2%,总秃斑度 60.8%,大幅度地超过重度退化区的平均值,临界阈现象发生在第 6—7 年的演变过程中。两次突变过程既伴随着临界阈现象的发生,也表明了草地的退化过程由量到质的转变。第 8 年,临近最大秃斑的一个小秃斑也与之连通,整个演示图上只有两个秃斑,总秃斑度(66.3%)十分接近极度退化总秃斑度的均值(68.9%)。秃斑地正逐渐沦为极度退化的“黑土滩”。

随着两个秃斑的继续扩张,演变 9a 后,总秃斑度高达 71.7%,最大秃斑的秃斑度为 67.4%,已达到实地观测的极度退化草地秃斑度的平均水平。从秃斑演变的整个过程来看,秃斑数量不断减少,最大秃斑的秃斑度和总秃斑度不断增大,秃斑逐渐扩大和连通,从离散状态向连通状态转变,形成了草地由初步退化到系统崩溃的符合实际的草地秃斑连通的图谱序列。将模拟值和实地调研数据比较(表 2)显示,在演变第 1 年、第 3 年和第 8 年,和实地调研的退化水平相一致,平均吻合度达 93.9%。

表 2 不同退化程度秃斑度比较

Table 2 The comparison of barren patch percentages at different degradations

	退化程度 Degradation level 演变年数 Developmental years	中度退化 Moderate degradation			重度退化 Heavy degradation					极度退化 Extreme degradation	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
秃斑度/%	模拟值 Simulated value	16.9	23.6	29.5	36.2	42.4	48.5	54.5	60.8	66.3	71.7
Barren patch	实际值 Observed value		20.8				37.2			68.9	
Percentage	吻合度 Goodness of fit		88.1				97.3			96.2	

2.2 秃斑连通进程及连通阈值的确定

秃斑的扩张和连通是原生高寒嵩草草甸退化到“黑土滩”过程的最重要、最明显的表征,而秃斑演变过程中面积的变化是秃斑连通效应最直观,也是最重要的表现。图 4 显示,最大秃斑面积与秃斑演变年数呈正相关,第 2 年和第 7 年最大秃斑面积增加速率明显加快。分析图 3 和表 2 可知,最大秃斑面积在演变第 1 年增加了 1.8%,由于临近秃斑的连通,因而第 2 年最大秃斑面积剧增了 12.7%,增加速率是第 1 年的 7.2 倍;在演变第 7 年同样由于两个较大秃斑的连通使得最大秃斑面积在第 7 年增加了 17.2%,增加速率是第 6 年(4.3%)的 4 倍。最大秃斑面积—秃斑总面积比总体上呈增加趋势,在第 2 年和第 7 年,最大秃斑面积—秃斑总面积比急速大幅上升,发生了明显的跃变。这是由于在秃斑演变的第 1—7 年,秃斑总面积基本上保持约 6% 的增加速率,而最大秃斑面积增加速率却在第 2 年和第 7 年显著加快。但在演变的第 0—1 年,第 2—6 年,第 7—9 年阶段,最大秃斑面积和秃斑总面积在现有扰动条件下基本上都以大致相等的速率扩大,所以,3 个阶段的最大秃斑面积—秃斑总面积比也分别呈稳定不变的情形。因而,以第 2 年、第 7 年为界,将秃斑连通进程划分为 3 个阶段:低速连通期——第 0—2 年、跃变期——第 2—7 年、连通不可逆转期——第 7—9 年,分别对应草地的中度退化阶段、重度退化阶段和极度退化阶段。由以上分析可见,最大秃斑面积、最大秃斑面积—秃斑总面积比的跃变过程也是草地退化等级的质变过程。

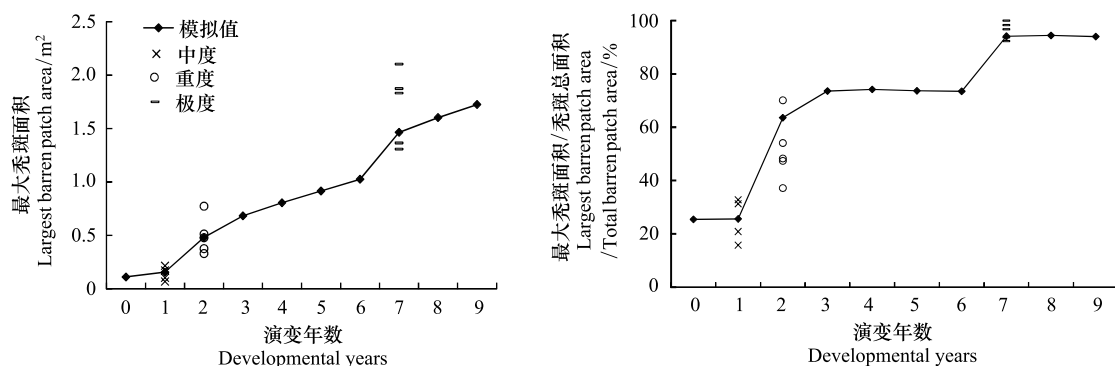


图 4 不同演变阶段最大秃斑面积、最大秃斑面积/秃斑总面积比

Fig. 4 Largest barren patch areas and Largest barren patch area/Total barren patch area at different developmental stages

由秃斑格局动态图(图 3)可以看出,演变第 6 年,景观生态学意义上的“连通秃斑”(即最小的秃斑互相连接而形成的特大秃斑)尚未出现,仍有草地生境通道存在。演变第 7 年,“连通秃斑”形成,使得草地更加支

离破碎,原有的草地生境通道已不复存在,而秃斑通道形成。根据渗透理论,允许连通缀块出现的最小生境面积的百分比称为渗透阈值,相应地,可以推断高寒草甸退化序列上秃斑连通的连通阈值出现在演变第6到第7年之间。结合高寒草甸的管理实践,此指标宜小不宜大,故选择演变第6年的秃斑度为阈值,对照表2可知,连通阈值为54.5%(秃斑度)。

3 讨论

3.1 CA 在草地秃斑格局动态模拟中的可行性

CA 是一种时间、空间、状态都离散,空间的相互作用及时间上的因果关系皆局部的网络动力学模型。由于 CA 固有的强大并行计算能力以及时空动态特征,使得它在模拟空间复杂系统的时间动态演变方面具有自然性、合理性和可行性^[33]。作为一种通用的建模方法,CA 的应用几乎涉及社会和自然科学的各个领域^[34-41]。由于草地秃斑扩张及格局演变的时空动态性及其机理复杂性,因此本研究首次尝试把 CA 模型用于高寒草甸生态系统草地秃斑格局动态模拟。放牧地秃斑的数量、面积、格局直接影响着周围草地物质、能量、信息的交流,而 CA 对于研究复杂系统的时空动态特征模拟具有其优势。此外,秃斑演变具有明显的扩散性、蔓延性等特征,也具备了 CA 模拟的基本条件^[42]。本研究所得总秃斑度的模拟值与观察值 93.9% 的吻合度说明,可以用 CA 来模拟草地秃斑动态演变。

3.2 秃斑连通的临界阈现象及其效应

秃斑的扩张和连通过程伴随着临界阈现象的发生:演变第2年,大量秃斑连通,最大秃斑的秃斑度从第1年的6.1%剧增到18.8%,草地退化等级从中度转为重度;第7年,“连通秃斑”出现,秃斑从高度离散状态突然转变为高度连通状态,重度退化草地沦为极度退化草地。临界阈现象在物理和生态学中普遍存在^[43],但是在草地斑块研究中或富有更多的内涵。

放牧地秃斑彼此连通的过程并非简单的景观格局的改变,更为重要的是在连通过程中所引发的环境效应。在引起秃斑连通的众多外部因素中,家畜践踏作用具有时间长、效果持久的特点,因而对草地的影响可能更为长远和深刻,在草地退化和健康维护中起主导作用^[44-46]。植被对家畜践踏最初的响应是相对盖度的降低^[47-48],随着践踏强度进一步加大,其结果是造成在现有的生态系统中产生裸露斑块,草地破碎化增高,原生植被生长和繁殖所需的连续生境被破坏,嵩草属等原生植物种类逐渐减少,次生植物大量定居^[49]。在秃斑的进一步连通过程中,植被地上与地下生物量消失殆尽,而秃斑由于缺少植被覆盖,具有其独特的理化性质。鲁春霞等^[50]在高寒草甸、草原化草甸和高寒草原的实验表明,在根系受到破坏后其土壤保水能力分别下降16%—30%,17.25%—32.1%和22%—50%,导致土壤干化,加剧了水土流失。并且土壤在缺少植被保护的情况下,与外界能量交换更为活跃,造成土壤贮碳能力下降。王俊峰等^[7]观测了青藏高原高寒草甸生长期内土壤 CO₂ 的排放,发现严重退化的高寒草甸 CO₂ 的排放通量是未退化的1.11—1.78倍,且高寒草甸由原生高寒嵩草草甸退化到“秃斑”地,“秃斑”地逐渐扩大为“黑土滩”的退化过程中,导致表层土总有机碳由47.47 g/kg 下降到17.63 g/kg^[44],流失达62.86%。杜岩功等^[51]报道退化高寒草甸的生长季表土均温比适牧高寒草甸高0.36℃,这可能是由于放牧家畜作用使高寒草甸上形成“秃斑”,由于土壤压实,其容积热容量增加,导热率增加,热扩散率也增大^[52],这也可能是导致草地退化进一步加剧的主要原因之一。

2010年8月10日观测高寒草甸样地退化序列上未退化、重度退化和极度退化(“黑土滩”)高寒草甸地表温度,发现生长期极度退化区日最高温可达60.58℃,而未退化高寒草甸日最高温仅为17.79℃,显然在极度退化区(“黑土滩”)形成了明显的“热岛”(图5)。由于秃斑地“热岛效应”使得水分蒸发增大,造成草毡表层土壤的干旱化,已不适于耐寒冷的中生型嵩草属植物的生长和发育^[53],再者,由于“黑土滩”心土裸露,造成养分丢失形成次生盐碱化土壤,速效养分严重降低、土层变薄,草地土壤质量严重退化,处于稳定顶级的嵩草属植物赖以生长的生境已经不复存在。

3.3 连通阈值及其保护学意义

秃斑演变过程中的连通阈值是“秃斑”地演变为“黑土滩”的临界值,标志着草地退化程度由量到质的转

变。从演变第 6 年没有出现“连通秃斑”,到第 7 年高度连续的“连通秃斑”形成过程,表明当总秃斑度趋近 54.5% 时,秃斑的连通效应对高寒草甸的影响已到了由量变到质变的临界区,如不及时降低牧压,“黑土滩”就必然形成。一旦形成“黑土滩”型退化草地,其恢复与治理将是难题。李希来^[54-55]和黄葆宁等^[56]的一系列补播试验结果也验证了这一点:实施种植禾草 5 年后就开始衰退,难以稳定“黑土滩”植物群落,不能改善群落中嵩草的优势地位,生态系统十分脆弱,随着家畜的再度利用,重新沦为“黑土滩”,甚至出现“砾石滩”,其退化程度更甚于治理前。直接补播嵩草,4a 后,嵩草仍处于幼苗阶段,几乎没有产量表现;即使把禾草和嵩草混播

也难以达到恢复“黑土滩”退化草地植被的效果^[55]。马玉寿等^[57]利用禾本科牧草在重度和极度退化草地上改建人工和半人工草地,初期很大程度上提高了植被盖度和地上生物量,但从第 3 年起,对比人工调控和自然演替的人工草地、以及不同调控措施下的人工草地发现,垂穗披碱草的盖度及地上生物量均开始下降,而人工调控草地的盖度及地上生物量下降速度较缓慢。可见,人工草地重建需要持续性的投资和管理,但目前持续性投资有限而重建人工草地存在衰退现象^[13]。再则,由于“黑土滩”退化草地植物群落中原生植被几乎消失殆尽,自然繁殖更新能力极低,仅靠封育在短期内难以恢复到初始状态。马玉寿等^[58]的自然恢复实验表明,“黑土滩”通过封育虽然盖度和总生物量均有了不同程度的提高,但优良牧草的恢复速度非常缓慢,封育 3 年后优良牧草的地上生物总量的比例只达到 8.3%。由此可见,“黑土滩”的形成过程不可逆转^[13],若要阻止“黑土滩”的形成,必须在秃斑的连通度未达到连通阈值(54.5%)时,就应该降低或解除现有的牧压,通过装置缓解秃斑“热岛效应”,加以补播、耙松及围栏封育等措施使草地得到休养生息。

影响放牧地秃斑连通的因素众多,其机理极其复杂,而本研究则利用 CA 对于研究复杂系统的时空动态特征的优势,将各种影响因素集成作用下的“秃斑”进行动态模拟,与实际比较具有极高的吻合度。当然,利用 CA 模拟高寒草甸秃斑动态研究并非局限于本实验,基于 CA 的可塑性,还可以将其用于模拟其他地区不同草地类型、不同放牧强度的草地斑块动态。这是因为草地在现有干扰下产生的退化关系序列是不变的,即草地由初步退化到系统崩溃的进程是不变的。只是由于放牧强度等干扰程度大小的不同,所以演变规则的规定相应地微调,因而达到同等退化程度的演变年数也随之改变(即模拟步长改变)。此外,由于 CA 模型的迭代次数可以和实际退化年限进行比对,通过模型迭代的次数就可以推测草地退化的大致年限,为草地管理提供便利。本研究是基于样方法在小尺度上进行的 CA 模拟方法的探索,因而,对于广袤草原的管理需要考虑尺度转换问题,如采用数字正射影像象限图或航空影像,以 ArcGIS 软件为平台,依据一定的空间分辨率进行数字化处理,是深入开展相关研究的一个重要方向。但可以肯定,将 CA 用于草地秃斑演变的动态模拟是草业科学中的研究方法创新,明确秃斑在高寒草甸退化序列上的演变、连通规律及其作用,在高寒草甸生态系统的维系、恢复和管理上具有积极意义。

4 结论

(1) CA 模拟形成了草地由初步退化到系统崩溃的符合实际的草地秃斑连通的图谱序列,模拟吻合度达 93.9%。

(2) 通过对秃斑演变、连通进行模拟,将演变进程分为 3 个阶段,低速连通期:第 0—2 年、跃变期:第 2—7 年、连通不可逆转期:第 7—9 年,分别对应高寒草甸的中度退化阶段、重度退化阶段和极度退化阶段。临界现象发生在秃斑演变跃变期的第 2 年和第 7 年。

(3) 演变第 7 年,秃斑从高度离散状态突变为高度连通状态,“黑土滩”不可避免地形成,重度退化草地

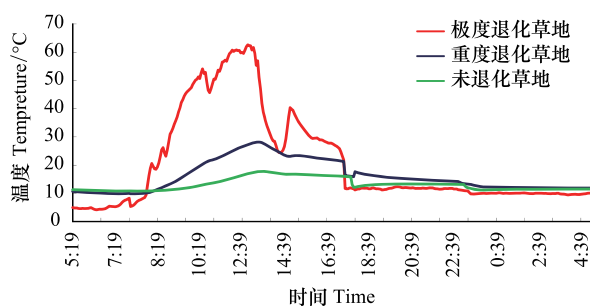


图 5 退化序列上高寒草甸表土温度日变化比较

Fig. 5 Comparison of diurnal variation of surface temperature in degradation sequence on alpine meadow

测定时间 2010 年 8 月 10 日, Measuring date: August 10, 2010

沦为极度退化草地。为了预防大面积不可逆转的“黑土滩”的形成,以连通阈值(54.5%)作为高寒草甸生态危机、系统崩溃的预警信号。

References:

- [1] Zeng Y N, Feng Z D, Cao G C, Xue L. The soil organic carbon storage and its spatial distribution of alpine grassland in the source region of the Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 497-504.
- [2] Zeng Y N, Feng Z D. Analysis of cause mechanism of desertification in headwater area of Yellow River. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(1): 45-52.
- [3] Zeng Y N, Feng Z D. Effect of desertification on soil organic carbon pool of grassland in headwater area of Yellow River. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(2): 208-211.
- [4] Tao Z, Shen C D, Gao Q Z, Sun Y M, Yi W X, Li Y N. Soil organic carbon storage and vertical distribution of alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(7): 720-728.
- [5] Tao Z, Shen C D, Gao Q Z, Sun Y M, Yi W X, Li Y N. Soil organic carbon storage and soil CO₂ flux in the alpine meadow ecosystem. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(7): 1103-1114.
- [6] Wang J F, Wang G X, Wang Y B, Li Y S. Influences of the degradation of swamp and alpine meadows on CO₂ emission during growing season on the Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(18): 2565-2574.
- [7] Wang J F, Wang G X, Wang Y B, Li Y S. CO₂ emissions from swamp and alpine meadow during the growing seasons on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Lanzhou University: Natural Science*, 2007, 43(5): 17-23.
- [8] Long R J. Functions of ecosystem in the Tibetan grassland. *Science and Technology Review*, 2007, 25(9): 26-28.
- [9] Ren J Z, Lin H L. Assumed plan on grassland ecological reconstruction in the source region of Yangtze River, Yellow River and Lantsang River. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(2): 1-8.
- [10] Lin H L, Wang Z Q, Shang Z H. Features on fractal dimension of barren patch and mouse hole among different degenerated succession stages on alpine meadow in the source region of the Yangtze and Yellow River, Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(4): 477-484.
- [11] Wang G X, Qian J, Cheng G D, Lai Y M. Soil organic carbon pool of grassland soils on the Qinghai-Tibetan Plateau and its global implication. *Science of the Total Environment*, 2002, 291(1/3): 207-217.
- [12] Shang Z H, Long R J. Formation reason and recovering problem of the ‘black soil type’ degraded alpine grassland in Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(6): 652-656.
- [13] Shang Z H, Long R J, Ma Y S. Discussion on restoration and rebuilding of ‘blackion soil patch’ degraded meadow in the headwater area of Yangtze and Yellow Rivers. *Chinese Journal of Grassland*, 2006, 28(1): 69-74.
- [14] Shang Z H, Long R J, Ma Y S. Review on environmental problems in the headwater areas of Yangtze and Yellow Rivers in Qinghai-Tibetan Plateau. *Pratacultural Science*, 2007, 24(3): 1-7.
- [15] Lin H L, Long R J, Ren J Z. Grazing-induced erosion: review and prospect. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(12): 2222-2227.
- [16] Xie B, Xiong C P, Liu X X. The origin, characteristics and countermeasures of prevention and control of soil and water loss of three-river water source region. *Soil and Water Conservation in China*, 2007, (11): 19-21.
- [17] Liang D Y, Lin L, Li Y K, Wang X, Cao G M. Process and mechanism of matic epipedon denudation taking place on degraded alpine meadows in the three river source region. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(1): 31-36.
- [18] Liu Y H, Li X L, Li C H, Sun H Q, Lu G X, Pan G X. Vegetation decline and reduction of soil organic carbon stock in high-altitude meadow grasslands in the source area of three major rivers of China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2559-2567.
- [19] Liu J, Luo C J, Cao J Y, Zhang W. Present status and distribution of soil erosion of the Three-River-Source area in Qinghai. *Soil and Water Conservation in China*, 2010, (9): 49-51.
- [20] Li J J, Li Y, Wang Y L, Wu J S. Study of soil erosion on the east-west transects in the three-rivers headwaters region using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex} tracing. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(12): 1452-1459.
- [21] Zhou H K, Zhao X Q, Tang Y H, Gu S, Zhou L. Alpine grassland degradation and its control in the source region of the Yangtze and Yellow Rivers, China. *Grassland Science*, 2005, 51(3): 191-203.
- [22] Shang Z H, Ma Y S, Long R J, Ding L M. Effect of fencing, artificial seeding and abandonment on vegetation composition and dynamics of ‘black soil land’ in the headwaters of the Yangtze and the Yellow Rivers of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Land Degradation and Development*, 2008, 19(5): 554-563.
- [23] Wang H, Zhou X L, Wan C G, Fu H, Zhang F, Ren J Z. Eco-environmental degradation in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau and comprehensive ecological protection planning. *Environmental Geology*, 2008, 55(5): 1135-1147.
- [24] Zhao Y, Peth S, Horn R, Krümmelbein J, Ketzer B, Gao Y Z, Doerner J, Bernhofer C, Peng X H. Modeling grazing effects on coupled water and

- heat fluxes in Inner Mongolia grassland. *Soil and Tillage Research*, 2010, 109(2): 75-86.
- [25] Nearing M A, Pruski F F, O'Neal M R. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 59(1): 43-50.
- [26] Zhang X W, Zhou Y M, Li X S, Yuan C, Yan N N, Wu B F. A review of remote sensing application in soil erosion assessment. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4): 1010-1017
- [27] Wolfram S. Cellular automata as models of complexity. *Nature*, 1984, 311(5985): 419-424.
- [28] Green D G. Connectivity and complexity in landscapes and ecosystems. *Pacific Conservation Biology*, 1994, 1(3): 194-200.
- [29] Sun F D, Long R J, Jiang W L, Lu C X. Biomass distribution characteristics of alpine meadow under different burrowing plateau pika density in Guoluo Region, Qinghai Province. *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 16(5): 475-479.
- [30] Sun F D, Long R J, Jiang W L, Guo Z G, Nie X M. Alpine meadow plant community biomass and soil bulk density characteristics in different burrowing rodent density plots in the "Three-River Headwaters" region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(5): 111-116.
- [31] Sun B G, Long R J, Kong Z, Feng R Z. A study on CO₂ emission rate from alpine meadow in the source region of Yellow river in Guo-luo, Qinghai Province. *Acta Agrestia Sinica*, 2007, 15(5): 449-453.
- [32] Ma Y S, Dong Q M, Shi J J, Sun X D, Wang Y L, Sheng L, Yang S H. Classification gradation and control measure of "black-soil-beach" degraded grassland in three river headwater region. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Science*, 2008, 38(3): 1-3.
- [33] Zhou C H, Sun Z L, Xie Y C. *Geographical Cellular Automata Study*. Beijing: Science Press, 1999: 50-80.
- [34] Wolfram S. *Theory and Applications of Cellular Automata*. Singapore: World Scientific, 1986.
- [35] Czárán T. *Spatiotemporal Models of Population and Community Dynamics*. London: Chapman and Hall, 1998.
- [36] Angulo J J. Interdisciplinary approaches in epidemic studies—II: four geographic models of the flow of contagious disease. *Social Science and Medicine*, 1987, 24(1): 57-69.
- [37] Doran R J, Laffan S W. Simulating the spatial dynamics of foot and mouth disease outbreaks in feral pigs and livestock in Queensland, Australia, using a susceptible-infected-recovered cellular automata model. *Preventive Veterinary Medicine*, 2005, 70(1/2): 133-152.
- [38] Batty M, Xie Y C, Sun Z L. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1999, 23(3): 205-233.
- [39] Batty M, Xie Y. From cells to cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1994, 21(7): s31-s48.
- [40] Webster C J, Wu F. Regulation, land-use mix, and urban performance. Part 1: theory. *Environment and Planning A*, 1999, 31(8): 1433-1442.
- [41] Vega E, Montaña C. Effects of overgrazing and rainfall variability on the dynamics of semiarid banded vegetation patterns: a simulation study with cellular automata. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(1): 70-77.
- [42] Zhao W J, Liu Z L. The application of cellular automata in environmental sciences. *Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition*, 2003, 35(2): 87-92.
- [43] Wu J G. *Landscape Ecology—Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [44] Wang W Y, Wang Q J, Lu Z Y. Soil organic carbon and nitrogen content of density fractions and effect of meadow degradation to soil carbon and nitrogen of fractions in alpine *Kobresia* meadow. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(5): 660-668.
- [45] Adler P B, Hall S A. The development of forage production and utilization gradients around livestock watering points. *Landscape Ecology*, 2005, 20(3): 319-333.
- [46] Wang Z Q, Lin H L. Features and application of a rangeland detection algorithm based on fractal dimensions to detect characteristics of barren patch. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(2): 156-162.
- [47] Bayfield N G. Recovery of four montane heath communities on Cairngorm, Scotland, from disturbance by trampling. *Biological Conservation*, 1979, 15(3): 165-179.
- [48] Cingolani A M, Cabido M R, Renison D, Neffa V S. Combined effects of environment and grazing on vegetation structure in Argentine granite grasslands. *Journal of Vegetation Science*, 2003, 14(2): 223-232.
- [49] Li X L. A preliminary study on biological diversity and features of communities in alpine meadow and its deteriorative result—"black soil patch". *Pratacultural Science*, 1996, 13(2): 21-23.
- [50] Lu C X, Yu G, Xie G D, Xiao Y. Wind tunnel simulation and assessment of soil moisture conservation of alpine grassland in Qinghai-Tibet Plateau. *Ecology and Environment*, 2007, 16(4): 1289-1293.
- [51] Du Y G, Cao G M, Wang Q L, Wang C T. Effect of grazing on surface character and soil physical property in alpine meadow. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(3): 338-343.
- [52] Hu H C, Wang G X, Wang Y B, Liu G S, Li T B, Ren D X. Response of soil heat-water processes to vegetation cover on the typical permafrost and seasonally frozen soil in the headwaters of the Yangtze and Yellow Rivers. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(7): 1225-1233.
- [53] Wang B S, Ga M J, Zhang Y. Study on the forming mechanism of "black beach" degraded alpine meadow on Qinghai-Tibetan Plateau and the research progress on its restoration. *Grassland and Turf*, 2007, (2): 72-77.

- [54] Li X L. Effects of resowing grasses on resuming vegetation of "black soil patch". *Pratacultural Science*, 1996, 13(5): 17-19.
- [55] Li X L, Huang B N. A preliminary report on seeding and reseeding grasses and *Kobresia* speices on "black soil patch" grassland. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 1996, 26(4): 9-11.
- [56] Huang B N, Li X L. A report of the experimental study on using fine species of *Kobresia* to resume vegetation of "black soil patch". *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 1996, 26(1): 1-5.
- [57] Ma Y S, Zhang Z H, Dong Q M, Shi J J, Wang Y L, Sheng L. Application of restoration ecology in "black soil type" degraded grassland rebuilding. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2007, 42(2): 91-97.
- [58] Ma Y S, Lang B N, Li Q Y, Shi J J, Dong Q M. Study on rehabilitating and rebuilding technologies for degenerated alpine meadow in the Changjiang and Yellow river source region. *Pratacultural Science*, 2002, 19(9): 1-5.

参考文献:

- [1] 曾永年, 冯兆东, 曹广超, 薛亮. 黄河源区高寒草地土壤有机碳储量及分布特征. *地理学报*, 2004, 59(4): 497-504.
- [2] 曾永年, 冯兆东. 黄河源区土地沙漠化成因机制分析. *自然灾害学报*, 2009, 18(1): 45-52.
- [3] 曾永年, 冯兆东. 黄河源区土地沙漠化及其对土壤碳库的影响研究. *中国沙漠*, 2008, 28(2): 208-211.
- [4] 陶贞, 沈承德, 高全洲, 孙彦敏, 易惟熙, 李英年. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征. *地理学报*, 2006, 61(7): 720-728.
- [7] 王俊峰, 王根绪, 王一博, 李元寿. 青藏高原沼泽及高寒草甸生长期内 CO₂ 排放. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2007, 43(5): 17-23.
- [8] 龙瑞军. 青藏高原草地生态系统之服务功能. *科技导报*, 2007, 25(9): 26-28.
- [9] 任继周, 林慧龙. 江河源区草地生态建设构想. *草业学报*, 2005, 14(2): 1-8.
- [10] 林慧龙, 王钊齐, 尚占环. 江河源区“黑土滩”退化草地秃斑与鼠洞的分形特征. *草地学报*, 2010, 18(4): 477-484.
- [12] 尚占环, 龙瑞军. 青藏高原“黑土型”退化草地成因与恢复. *生态学杂志*, 2005, 24(6): 652-656.
- [13] 尚占环, 龙瑞军, 马玉寿. 江河源区“黑土滩”退化草地特征、危害及治理思路探讨. *中国草地学报*, 2006, 28(1): 69-74.
- [14] 尚占环, 龙瑞军, 马玉寿. 青藏高原江河源区生态环境安全问题分析与探讨. *草业科学*, 2007, 24(3): 1-7.
- [15] 林慧龙, 龙瑞军, 任继周. 放牧侵蚀研究回顾与展望. *生态学杂志*, 2008, 27(12): 2222-2227.
- [16] 谢颀, 熊成品, 刘寻续. 三江源地区水土流失成因、特点及防治对策. *中国水土保持*, 2007, (11): 19-21.
- [17] 梁东营, 林丽, 李以康, 王溪, 曹广民. 三江源退化高寒草甸草毡表层剥蚀过程及发生机理的初步研究. *草地学报*, 2010, 18(1): 31-36.
- [18] 刘育红, 李希来, 李长慧, 孙海群, 芦光新, 潘根兴. 三江源区高寒草甸湿地植被退化与土壤有机碳损失. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2559-2567.
- [19] 刘杰, 骆婢娟, 曹江源, 张卫. 青海三江源区土壤侵蚀现状及其分布. *中国水土保持*, 2010, (9): 49-51.
- [20] 李俊杰, 李勇, 王仰麟, 吴健生. 三江源区东西样带土壤侵蚀的¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb_{ex} 示踪研究. *环境科学研究*, 2009, 22(12): 1452-1459.
- [26] 张喜旺, 周月敏, 李晓松, 袁超, 闫娜娜, 吴炳方. 土壤侵蚀评价遥感研究进展. *土壤通报*, 2010, 41(4): 1010-1017.
- [29] 孙飞达, 龙瑞军, 蒋文兰, 路承香. 青海果洛地区不同鼠洞密度下高寒草甸植物生物量分布特征. *草地学报*, 2008, 16(5): 475-479.
- [30] 孙飞达, 龙瑞军, 蒋文兰, 郭正刚, 聂学敏. 三江源区不同鼠洞密度下高寒草甸植物群落生物量和土壤容重特性研究. *草业学报*, 2008, 17(5): 111-116.
- [31] 孙步功, 龙瑞军, 孔郑, 冯瑞章. 青海果洛黄河源区高寒草甸 CO₂ 释放速率研究. *草地学报*, 2007, 15(5): 449-453.
- [32] 马玉寿, 董全民, 施建军, 孙小弟, 王彦龙, 盛丽, 杨时海. 三江源区“黑土滩”退化草地的分类分级及治理模式. *青海畜牧兽医杂志*, 2008, 38(3): 1-3.
- [33] 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究. 北京: 科学出版社, 1999: 50-80.
- [42] 赵文杰, 刘兆理. 元胞自动机在环境科学中的应用. *东北师大学报: 自然科学版*, 2003, 35(2): 87-92.
- [43] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [46] 王钊齐, 林慧龙. 基于分形维数的放牧地秃斑特征提取方法及其应用. *草业学报*, 2011, 20(2): 156-162.
- [49] 李希来. 高寒草甸草地与其退化产物——“黑土滩”生物多样性和群落特征的初步研究. *草业科学*, 1996, 13(2): 21-23.
- [50] 鲁春霞, 于格, 谢高地, 肖玉. 风蚀条件下人类活动对高寒草地水分保持功能影响的定量模拟. *生态环境*, 2007, 16(4): 1289-1293.
- [51] 杜岩功, 曹广民, 王启兰, 王长庭. 放牧对高寒草甸地表特征和土壤物理性状的影响. *山地学报*, 2007, 25(3): 338-343.
- [53] 王宝山, 尕玛加, 张玉. 青藏高原“黑土滩”退化高寒草甸草原的形成机制和治理方法的研究进展. *草原与草坪*, 2007, (2): 72-77.
- [54] 李希来. 补播禾草恢复“黑土滩”植被的效果. *草业科学*, 1996, 13(5): 17-19.
- [55] 李希来, 黄葆宁. “黑土滩”退化草地补种禾草和高草试验初报. *青海畜牧兽医杂志*, 1996, 26(4): 9-11.
- [56] 黄葆宁, 李希来. 利用高草属优良牧草恢复“黑土滩”植被试验研究报告. *青海畜牧兽医杂志*, 1996, 26(1): 1-5.
- [57] 马玉寿, 张自和, 董全民, 施建军, 王彦龙, 盛丽. 恢复生态学在“黑土型”退化草地植被改建中的应用. *甘肃农业大学学报*, 2007, 42(2): 91-97.
- [58] 马玉寿, 郎伯宁, 李青云, 施建军, 董全民. 江河源区高寒草甸退化草地恢复与重建技术研究. *草业科学*, 2002, 19(9): 1-5.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 9 May, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Responses and weigh of multi-ecosystem services and its economic value under different land cover scenarios: a case study from Ertan water control pivot in Yalong River	GE Jing, WU Nan, GAO Jixi, et al (2629)
Influence of grazing on biomass, growth ratio and compensatory effect of different plant groups in <i>Kobresia parva</i> meadow	DONG Quanmin, ZHAO Xinquan, MA Yushou, et al (2640)
Stocking effectiveness of hatchery-released kuruma prawn <i>Penaeus japonicus</i> in the Xiangshan Bay, China	JIANG Yazhou, LING Jianzhong, LIN Nan, et al (2651)
The spatial pattern of landscape fragmentation and its relations with urbanization and socio-economic developments: a case study of Beijing	QIU Jiangxiao, WANG Xiaoke, LU Fei, et al (2659)
Cellular automata simulation of barren patch connectivity effect in degradation sequence on alpine meadow in the source region of the Yangtze and Yellow rivers, Qinghai-Tibetan Plateau, China	LI Xueling, LIN Huilong (2670)
Evolution law of architectural landscape during the urban renewal process in Tiexi District	ZHANG Peifeng, HU Yuanman, XIONG Zaiping, et al (2681)
Competition for light and crop productivity in an agro-forestry system in the Hilly Region, Shangluo, China	PENG Xiaobang, ZHANG Shuoxin (2692)
Evaluation of forest ecosystem services based on biomass in Shanxi Province	LIU Yong, LI Jinchang, YANG Yonggang (2699)
Research on the morphological interactions between <i>Tamarix ramosissima</i> thickets and Nebkhas under different sand supply conditions; a case study in Cele oasis-desert ecotone	YANG Fan, WANG Xueqin, YANG Dongliang, et al (2707)
Litter decomposition and nutrient release in typical secondary and primary forests in karst region, Northwest of Guangxi	ZENG Zhaoxia, WANG Kelin, ZENG Fuping, et al (2720)
Spatial patterns of dominant species in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Jiulian Mountain Jiangxi Province, China	FAN Juan, ZHAO Xiuhai, WANG Jinsong, et al (2729)
Characteristics of seedlings regeneration in <i>Quercus aliena</i> var. <i>acuteserrata</i> secondary forests in Qinling Mountains	KANG Bing, WANG Dexiang, LI Gang, et al (2738)
Xylem hydraulic traits of <i>Populus euphratica</i> Oliv. in extremely drought environment	AYOUPU Mubareke, CHEN Yaning, HAO Xingming, et al (2748)
Response characteristics of leaf traits of common species along an altitudinal gradient in Hongchiba Grassland, Chongqing	SONG Lulu, FAN Jiangwen, WU Shaohong, et al (2759)
Changes of carbon input influence soil respiration in a <i>Pinus tabulaeformis</i> plantation	WANG Jinsong, ZHAO Xiuhai, ZHANG Chunyu, et al (2768)
Effects of different habitats and coverage treatments on the fates of <i>Quercus wutaishanica</i> seeds under the predation pressure of rodents	YAN Xingfu, ZHOU Libiao, LIU Jianli (2778)
Nested analysis of urban woodlot bird communities in Minhang District of Shanghai	WANG Benyao, WANG Xiaoming, WANG Tianhou, et al (2788)
Production dynamics and trophic basis of three dominant mayflies in the continuum of Shenglihe Stream in the Bahe River Basin	DENG Shan, YE Caiwei, WANG Lixiao, et al (2796)
Effects of sedimentation thickness of shrimp pond cleaning discharges on <i>Acanthus ilicifolius</i> seedlings	LI Ting, YE Yong (2810)
Utilization of carbon sources by the soil microbial communities of different forest types in subtropical Australia	LU Shunbao, GUO Xiaomin, RUI Yichao, et al (2819)
Soil microbial community characteristics under different vegetation types at the Holocene-basalt Platform, Jingpo Lake area, Northeast China	HUANG Yuanyuan, QU Laiye, QU Xiuchun, et al (2827)
Effect of <i>Ipomoea aquatica</i> Floating-bed on the quantity and distribution of nitrogen cycling bacteria and nitrogen removal	TANG Yingying, LI Xiuzhen, ZHOU Yuanqing, et al (2837)
Effects of microbial inoculants on soil microbial diversity and degrading process of corn straw returned to field	LI Peipei, ZHANG Dongdong, WANG Xiaojuan, et al (2847)

Effects of coupling film-mulched furrow-ridge cropping with maize straw soil-incorporation on maize yields and soil organic carbon pool at a semiarid loess site of China	WU Rongmei, WANG Yongpeng, LI Fengmin, et al (2855)
Residues and spatial distribution of OCPs in the sediments of Gan River Basin ...	LIU Xiaozhen, ZHAO Ci, LIANG Yu, et al (2863)
Analysis on population fluctuation and properties of the white-backed planthopper in Huizhou in 2009	 DIAO Yonggang, YANG Haibo, QU Yufeng, et al (2872)
Evaluation acaricidal activities of <i>Momordica cochinchinensis</i> extracts against <i>Tetranychus cinnabarinus</i>	 GUO Huili, SHI Guanglu, JIA Liangxi, et al (2883)
Stomatal ozone uptake modeling and comparative analysis of flux-response relationships of winter wheat	 TONG Lei, FENG Zongwei, Sudebilige, et al (2890)

Review and Monograph

Calculation method of energy ecological footprint based on global net primary productivity	 FANG Kai, DONG Deming, LIN Zhuo, et al (2900)
Behavioral patterns, influencing factors, functions and risks of social play in primates	 WANG Xiaowei, ZHAO Haitao, QI Xiaoguang, et al (2910)

Discussion

Spatio-Temporal changing analysis on carbon storage of harvested wood products in China	 LUN Fei, LI Wenhua, WANG Zhen, et al (2918)
---	---

Scientific Note

Variations in allometrical relationship between stand nitrogen storage and biomass as stand development	 CHENG Dongliang, ZHONG Quanlin, LIN Maozi, et al (2929)
Effect of continuous cropping of sesame on rhizospheric microbial communities	 HUA Juling, LIU Guangrong, HUANG Jinsong (2936)
Effects of clipping on the growth, gas exchange and chlorophyll fluorescence of invasive plant, <i>Flaveria bidentis</i>	 WANG Nannan, HUANGFU Chaohe, CHEN Dongqing, et al (2943)
Influence of vegetable cultivation methods on soil organic carbon sequestration rate	 LIU Yang, YU Dongsheng, SHI Xuezheng, et al (2953)
Integrated matrix-hydrology-biological remediation technology for bank collapse lakeside zone of Chaohu Lake	 CHEN Yunfeng, ZHANG Yanhui, ZHENG Xiqiang (2960)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 9 期 (2012 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 9 (May, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元